

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素

李芸邑, 刘利萍, 刘元元



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年8月

第42卷 第8期
Vol.42 No.8

目次

上海市夏季臭氧污染特征及削峰方案	严茹莎, 王红丽, 黄成, 王倩, 安静宇 (3577)
天津市夏季不同臭氧浓度级别 VOCs 特征及来源	王文美, 高璟赞, 肖致美, 李源, 毕温凯, 李立伟, 杨宁, 徐虹, 孔君 (3585)
重庆市主城区 O ₃ 污染时期大气 VOCs 污染特征及来源解析	李陵, 李振亮, 张丹, 方维凯, 徐芹, 段林丰, 卢培利, 王锋文, 张卫东, 翟崇治 (3595)
汽车维修行业挥发性有机物排放特征及大气化学反应活性	陈鹏, 张月, 张梁, 熊凯, 邢敏, 李珊珊 (3604)
2016 冬季京津冀一次持续重度霾天气过程分析	毛曳, 张恒德, 朱彬 (3615)
北京与成都大气污染特征及空气质量改善效果评估	党莹, 张小玲, 饶晓琴, 康平, 何建军, 卢宁生, 华明, 向卫国 (3622)
郑州市 PM _{2.5} 组分、来源及其演变特征	赵孝因, 王申博, 杨洁茹, 马秋红, 刘洋, 张瑞芹 (3633)
上海市 PM _{2.5} 中重金属元素对 COVID-19 控制的高频响应	程凯, 常运华, 旷雅琼, 邹忠 (3644)
粤港澳大湾区吸收性气溶胶的解析	段家乐, 巨天珍, 黄蕊蕊, 梁卓红, 范佳晨 (3652)
河南省 2016~2019 年机动车大气污染物排放清单及特征	高丹丹, 尹沙沙, 谷幸珂, 卢轩, 张欢, 张瑞芹, 王玲玲, 齐艳杰 (3663)
广州地区室内灰尘中典型非邻苯增塑剂的污染特征与暴露风险	刘晓途, 彭长凤, 陈达, 石玉盟, 汤书琴, 谭弘李, 黄维 (3676)
天津市主要河流和土壤中全氟化合物空间分布、来源及风险评价	武倩倩, 吴强, 宋帅, 任加国, 杨胜杰, 吴颜岐 (3682)
河网水源生态湿地水氢氧同位素分异特征	杨婷, 王阳, 徐静怡, 吴萍, 王为东 (3695)
重要饮用水源地天目湖水库有色可溶性有机物来源与组成特征	周蕾, 周永强, 张运林, 朱广伟 (3709)
城市不同类型水体有色可溶性有机物来源组成特征	俞晓琴, 崔扬, 陈慧敏, 朱俊羽, 李宇阳, 郭燕妮, 周永强, 韩龙飞 (3719)
白洋淀典型淀区沉积物间隙水溶解性有机物的光谱时空演变特征	周石磊, 陈召莹, 张甜娜, 张紫薇, 孙悦, 姚波, 崔建升, 李再兴, 罗晓 (3730)
夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化	宁成武, 包妍, 黄涛, 王杰 (3743)
洪泽湖浮游动物时空分布特征及其驱动因素	陈业, 彭凯, 张庆吉, 蔡永久, 张永志, 龚志军, 项贤领 (3753)
农业耕作对三峡水库支流库湾消落带土壤氮、磷含量及流失的影响	罗芳, 鲁伦慧, 李哲, 韦方强 (3763)
沱江流域总氮面源污染负荷时空演变	肖宇婷, 姚婧, 湛书, 樊敏 (3773)
微塑料对海水抗生素抗性基因的影响	周曙屹, 朱永官, 黄福义 (3785)
磺胺甲噁唑对海水养殖废水处理过程中抗性细菌及抗性基因的富集作用	王金鹏, 赵阳国, 胡钰博 (3791)
潮汐-复合流人工湿地系统优化及对抗生素抗性基因的去除效果	程羽霄, 吴丹, 陈铨乐, 高方舟, 杨永强, 刘有胜, 应光国 (3799)
三峡库区香溪河库湾土壤多环芳烃时空分布特征及风险评价	黄应平, 金蕾, 朱灿, 李锐, 谢平, David Johnson, 刘慧刚, 席颖 (3808)
长江经济带工业污染排放空间分布格局及其影响因素	李芸邑, 刘利萍, 刘元元 (3820)
淡水系统中 4 种塑料颗粒的老化过程及 DOC 产物分析	李婉逸, 刘智临, 苗令占, 侯俊 (3829)
DOM 对沉积物悬浮颗粒吸附铜的促进作用及机制	丁翔, 李忠武, 徐卫华, 黄梅, 文佳骏, 金昌盛, 周咪, 陈佳 (3837)
市政污水二级出水中溶解性有机质在紫外/氯处理过程中的转化特性	王雪凝, 张炳亮, 潘丙才 (3847)
亚硝酸盐不同生成方式对短程硝化反硝化除磷颗粒系统的影响	王文琪, 李冬, 高鑫, 张杰 (3858)
A ² /O 与倒置 A ² /O 工艺低温条件下的氨氮去除能力解析	李金成, 郭雅妮, 齐嵘, 杨敏 (3866)
厌氧氨氧化启动过程细菌群落多样性及 PICRUS2 功能预测分析	闫冰, 付嘉琦, 夏嵩, 易其臻, 桂双林, 吴九九, 熊继海, 魏源送 (3875)
活性污泥微生物群落结构及与环境因素响应关系分析	马切切, 袁林江, 牛泽栋, 赵杰, 黄崇 (3886)
汾河沿岸农田土壤微塑料分布特征及成因解析	朱宇恩, 王瀚萱, 李唐慧烟, 李华, 吴超, 张桂香, 阎敬 (3894)
基于 GIS 及 APCS-MLR 模型的兰州市主城区土壤 PAHs 来源解析	管贤贤, 周小平, 雷春妮, 彭熾雯, 张松林 (3904)
典型碳酸盐岩区耕地土壤剖面重金属形态迁移转化特征及生态风险评价	唐世琪, 刘秀金, 杨柯, 郭飞, 杨峰, 马宏宏, 刘飞, 彭敏, 李括 (3913)
大气 CO ₂ 摩尔分数升高对高、低应答水稻稻田 N ₂ O 排放的影响	于海洋, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (3924)
椰糠生物炭对热区双季稻田 N ₂ O 和 CH ₄ 排放的影响	王紫君, 王鸿浩, 李金秋, 伍延正, 符佩娇, 孟磊, 汤水荣 (3931)
不同水分管理条件下添加生物炭对琼北地区水稻土 N ₂ O 排放的影响	王鸿浩, 谭梦怡, 王紫君, 符佩娇, 李金秋, 汤水荣, 伍延正, 孟磊 (3943)
物种多样性对铅锌尾矿废弃地植被及土壤的生态效应	杨胜香, 曹建兵, 李凤梅, 彭禧柱 (3953)
来利山锡尾矿区优势植物调查与生态修复潜力分析	秦芙蓉, 张仕颖, 夏运生, 张乃明, 吴程龙, 何忠俊, 岳献荣, 田森林 (3963)
黄河源区高寒沼泽湿地土壤微生物群落结构对不同退化的响应	林春英, 李希来, 张玉欣, 孙华方, 李成一, 金立群, 杨鑫光, 刘凯 (3971)
秸秆还田配施化肥对稻-油轮作土壤酶活性及微生物群落结构的影响	靳玉婷, 李先藩, 蔡影, 胡宏祥, 刘运峰, 付思伟, 张博睿 (3985)
镉胁迫对芒草根际细菌群落结构、共发生网络和功能的影响	陈兆进, 林立安, 李英军, 陈彦, 张浩, 韩辉, 吴乃成, Nicola Fohrer, 李玉英, 任学敏 (3997)
岩溶区稻田土壤真菌群落结构及功能类群特征	周军波, 靳振江, 肖筱怡, 冷蒙, 王晓彤, 潘复静 (4005)
锌冶炼地块剖面土壤对镉、铅的吸附特征及机制	刘凌青, 肖细元, 郭朝晖, 彭驰, 姜智超, 阳安迪 (4015)
不同土壤调理剂对土壤镉和邻-苯二甲酸酯迁移转化影响	王璨, 张煜行, 何明靖, 刘文新, 卢俊峰, 魏世强 (4024)
4 种钝化剂对污染水稻土中 Cu 和 Cd 的固持机制	丁园, 敖师营, 陈怡红, 肖亮亮 (4037)
叶施 L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响	张雅芸, 王常荣, 刘月敏, 刘雅萍, 刘仲齐, 张长波, 黄永春 (4045)
镉对不同生长期籽粒菹植物螯合肽的影响	刘佳欣, 陈文清, 杨力, 李娜, 王宇豪, 康愉晨 (4053)
中国造纸业物质代谢演化特征	刘欣, 杨涛, 武慧君, 袁增伟 (4061)
《环境科学》征订启事 (3651) 《环境科学》征稿简则 (3718) 信息 (3836, 3885, 3893)	

夏季巢湖入湖河流溶解性有机质来源及其空间变化

宁成武, 包妍, 黄涛*, 王杰

(安徽大学资源与环境工程学院, 湿地生态保护与修复安徽省重点实验室, 合肥 230601)

摘要: 使用紫外-可见光吸收光谱(UV-vis)和三维荧光光谱-平行因子分析法(EEM-PARAFAC), 分析了2019年夏季巢湖流域丰乐河、杭埠河、岐阳河、兆河和南淝河水体溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)的来源及其空间变化。结果表明, 南淝河DOM吸收特征参数SUVA₂₅₄显著低于其它河流, 而光谱斜率比 S_R 显著高于杭埠河, 表明城市污染物径流排入降低了南淝河水体DOM的芳香性, 但对其分子量影响较低。南淝河DOM荧光指数(FI)和生物源指数(BIX)大于其它河流, 而腐殖化指数(HIX)低于其它河流, 指示其DOM自生源高于其它河流。使用EEM-PARAFAC从河流DOM中提取出4种类腐殖质组分(C1~C4)和2种内源类蛋白荧光组分(C5、C6), 其中, 类腐殖质组分包括陆源有机质(C1、C3和C4)和微生物降解产物(C2)。沿河流方向, 5条河流河水溶解性有机碳(dissolved organic carbon, DOC)、 $a(355)$ 和DOM荧光组分呈不同的空间变化特征, 其中丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河DOM受农田土壤径流输入影响明显, 而南淝河DOM主要受城市污染物径流和污水处理厂出水影响。

关键词: 溶解性有机质(DOM); 紫外-可见光吸收光谱(UV-vis); 三维荧光光谱; 平行因子分析法; 巢湖流域

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)08-3743-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202012089

Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed

NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao*, WANG Jie

(Anhui Province Key Laboratory of Wetland Ecosystem Protection and Restoration, School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: The sources and spatial variations of dissolved organic matter (DOM) in summer water of inflow rivers (FL, HB, QY, ZH, and NF) along the Chaohu Lake watershed were analyzed using the ultraviolet-visible absorption spectrum (UV-vis) method and three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy-parallel factor analysis (EEM-PARAFAC). The specific ultraviolet absorbance of DOM at 254 nm in the NF river was lower than in other rivers, and the spectral slope ratio (S_R) of the NF river was higher than that of the HB river. This showed that the urban runoff inputs reduce the aromaticity of DOM in the NF river water, but has little effect on the molecular weight. The high fluorescence index (FI) and biological index, and the low humification index, indicated the main autochthonous sources of the DOM in the NF river. Four humic-like components (C1-C4), comprising terrestrial organic matter (C1, C3, and C4) and microbial degradation products (C2), and two protein-like components (C5 and C6) were identified as the main sources of DOM in the inflow rivers along the Chaohu Lake watershed. The dissolved organic carbon and DOM fluorescence components in the river water exhibited spatial variation along the direction of flow. The DOM in water from FL, HB, QY, and ZH was sourced from soil runoff inputs, whereas in NF water, it was mainly sourced from urban runoff and wastewater treatment plant effluents.

Key words: dissolved organic matter (DOM); ultraviolet-visible spectrum (UV-vis); three-dimensional excitation emission matrix fluorescence spectroscopy; parallel factor analysis; Chaohu Lake watershed

水体溶解性有机质(dissolved organic matter, DOM)主要由腐殖质、碳水化合物和类蛋白等组成, 具有影响重金属迁移转化、氮磷营养盐转化循环及碳循环的作用^[1~4]。自然水体DOM主要来自陆地植物凋落物、土壤有机质等外源输入和水生动植物残体降解、微生物死亡分解等内源贡献。河流是陆地和湖泊、海洋的过渡区, 在碳输送和转化过程中起着重要作用^[5,6]。河流水体DOM可以影响微生物乃至水生食物网的动态变化^[7]。河流DOM的变化与流域内土壤类型、湿地覆盖、农业土地使用和城市污水排放有关^[8~10]。此外, 河流水体DOM还受到光漂白^[11,12]和水生微生物降解^[13]的影响。在分析技术方面, 紫外-可见光吸收光谱(ultraviolet-visible

spectrum, UV-vis)和三维荧光-平行因子分析法(EEM-PARAFAC)已经广泛应用于河流、湖泊和海洋环境中DOM的光学特征研究, 用于指示DOM组成以及荧光组分来源^[14~17]。DOM吸收特征参数SUVA₂₅₄和光谱斜率比 S_R 可以提供DOM的芳香性和分子量的信息^[18,19]; 荧光指数(FI)、生物源指数(BIX)和腐殖化指数(HIX)可以表征DOM的来源特征^[20~22]。

收稿日期: 2020-12-10; 修订日期: 2021-01-19

基金项目: 安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0042); 国家自然科学基金项目(41476165)

作者简介: 宁成武(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为生态与环境修复技术, E-mail: ningcw@126.com

* 通信作者, E-mail: huangt@ahu.edu.cn

近年来,快速的城市发展和流域内高强度农业种植活动使得大量污染物通过河流排放至巢湖,导致水体污染、富营养化乃至蓝藻暴发等一系列生态环境问题^[23,24].作为污染物向湖泊传输的主要通道,巢湖入湖河流在夏季丰水期径流输入量占全年一半以上^[25],大量有机物随地表径流进入河流水体,改变 DOM 来源和结构特征的同时,对河流水质和管理造成极大压力;同时,夏季高温和强太阳辐射加快河流水体 DOM 降解、转化并影响其它污染物的迁移转化.巢湖水体污染物主要来源于城市和农业面源,研究夏季入湖河流水体污染状况、来源及性质,对提高河流纳污能力和污染物综合治理具有重要作用.目前对河流 DOM 的研究主要集中在城市纳污河流^[22,26,27],而对农业面源污染河流水体 DOM 组成和来源特征的研究尚有不足.为此,本文选择巢湖流域流经农业种植区的丰乐河、杭埠河、岐阳河、兆河和典型城市纳污河流南淝河为研究对象,使用 UV-vis 和 EEM-PARAFAC 对夏季河流水体 DOM 吸收和荧光特征进行研究,分析河流水体 DOM 组成、来源、空间变化及其影响因素,以期对河流水体污染监测与防

治提供参考.

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究涉及巢湖 5 条入湖河流及相对应的小流域,采用 ArcGIS 10.2 处理地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>)提供的 ASTER GDEM 30M 分辨率数字高程图确定每条河流流域面积,结合 Globeland30(<http://www.globallandcover.com>)提供的土地利用现状确定各流域土地覆盖面积情况[表 1,土地覆盖(%) = 流域内土地覆盖面积/流域面积].如图 1 所示,丰乐河流经舒城县和肥西县,后汇入杭埠河,流域内土地以农业种植为主,流域面积约 1 977 km².杭埠河流经岳西县、舒城县、庐江县和肥西县,上游多为山地,以森林覆盖为主,下游以农业种植为主,流域面积约 2 376 km².岐阳河流域内土地以农业种植为主,流域面积约 77 km².兆河流经庐江县和巢湖市,流域内土地以农业种植为主,流域面积约 1 342 km².南淝河流经合肥市,水源主要为上游水库和降水,是合肥市的主要纳污河流,流域面积约 1 659 km².

表 1 巢湖入湖河流域土地覆盖

Table 1 Land cover along inflow rivers of the Chaohu Lake watershed						
河流	流域面积/km ²	土地覆盖/%				
		耕地	林地	草地	水域	建设用地
丰乐河	1 977	83.6	13.4	0.1	0.6	2.2
杭埠河	2 376	41.7	53.3	0.3	2.2	2.8
岐阳河	78	83.0	2.3	0.1	0.7	14.0
兆河	1 343	73.3	18.4	0.1	2.9	5.2
南淝河	1 659	55.1	6.0	1.4	2.9	34.6

1.2 样品采集和预处理

2019 年夏季 7 月于巢湖流域丰乐河(FL)、杭埠河(HB)、岐阳河(QY)、兆河(ZH)和南淝河(NF)使用有机玻璃采水器采集 0~50 cm 表层水样,采样点分布和编号如图 1 所示.采集的水样放于聚乙烯塑料瓶中并编号,保温箱内保存.水样经 0.45 μm 滤膜过滤,再使用聚醚砜水系针式滤头(0.22 μm)过滤后放入冰箱中 4℃ 保存,一周内完成样品分析.

1.3 水体 DOC 测定

取过滤水样 15 mL,使用总有机碳分析仪(Elementa vario)测定溶解性有机碳(DOC)的浓度,单位为 mg·L⁻¹,仪器内置稀盐酸用于去除无机碳.

1.4 DOM 吸收光谱测定

以去离子水作空白,使用 UV-vis(日立 U4100)测定过滤水样的吸光度,测量波长范围为 200~700 nm,分辨间隔为 1 nm.吸收系数计算公式如下:

$$a'(\lambda) = 2.303D(\lambda)/r \tag{1}$$

$$a(\lambda) = a'(\lambda) - a'(700)/700 \tag{2}$$

式中, $a'(\lambda)$ 为波长 λ 处未校正的 DOM 吸收系数(m⁻¹), $D(\lambda)$ 为波长 λ 处吸光度, r 为光程路径(m), $a(\lambda)$ 为波长 λ 处经过校正的吸收系数(m⁻¹), $a'(700)$ 为波长 700 nm 处未校正的吸收系数.以吸收系数 $a(355)$ 表示有色溶解性有机质(chromophoric dissolved organic matter, CDOM)的相对含量(m⁻¹)^[28].将吸收斜率拟合为公式,得出光谱斜率(S, nm^{-1})^[29]:

$$S = \ln\left[\frac{a(\lambda)}{a(\lambda_0)}\right]/(\lambda_0 - \lambda) \tag{3}$$

式中, S 为 DOM 吸收系数的光谱斜率(nm⁻¹), $a(\lambda)$ 为波长 λ 时 DOM 的吸收系数(m⁻¹), $a(\lambda_0)$ 为波长为 λ_0 时的吸收系数.光谱斜率比(S_R)通过 $S_{275-295}/S_{350-400}$ 获得,与 DOM 分子量呈负相关^[19].

SUVA₂₅₄越大对应样品的芳香性越强、腐殖化程度越高. SUVA₂₅₄[L·(mg·m)⁻¹]计算公式^[18]:

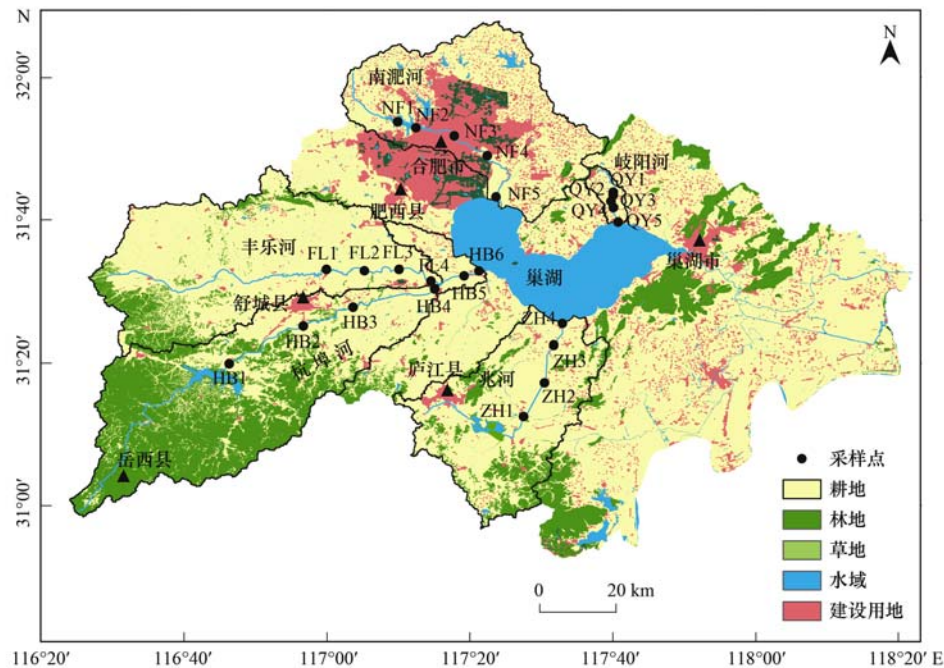


图1 巢湖入湖河流采样点示意

Fig. 1 Sampling sites of inflow river waters along the Chaohu Lake watershed

$$\text{SUVA}_{254} = a(254)/\text{DOC} \quad (4)$$

式中, $a(254)$ 为波长 254 nm 处的吸收系数 (m^{-1}), DOC 为样品中溶解性有机碳浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

1.5 三维荧光光谱测定

荧光分光光度计(日立 F-4600)用于样品三维荧光光谱测定. 扫描范围: 激发波长 (E_x) 为 200 ~ 450 nm, 间隔为 5 nm; 发射波长 (E_m) 为 250 ~ 550 nm, 间隔为 5 nm. 去离子水作空白去除拉曼散射. 荧光强度进行拉曼归一化, 所得的相对荧光强度以拉曼单位表示 (R. U.)^[30]. FI 表征 DOM 的来源, BIX 表征新近自生 DOM 的贡献, HIX 表征 DOM 的腐殖化程度, FI、BIX 和 HIX 通过以下公式计算^[21,31,32], 其中 F 为荧光强度.

$$\text{FI} = \frac{F(E_x = 370 \text{ nm}, E_m = 470 \text{ nm})}{F(E_x = 370 \text{ nm}, E_m = 520 \text{ nm})} \quad (5)$$

$$\text{BIX} = \frac{F(E_x = 310 \text{ nm}, E_m = 380 \text{ nm})}{F(E_x = 310 \text{ nm}, E_m = 430 \text{ nm})} \quad (6)$$

$$\text{HIX} = \frac{F(E_x = 255 \text{ nm}, E_m = 435 \sim 480 \text{ nm})}{F(E_x = 255 \text{ nm}, E_m = 300 \sim 345 \text{ nm})} \quad (7)$$

1.6 数据分析

使用 SPSS 22.0 进行皮尔逊相关分析 ($P < 0.01$ 表示极显著相关); 使用单因素 ANOVA 检验样本组之间的差异显著性 ($P < 0.05$ 表示差异显著). 使用 Origin 2017 统计数据并绘图, 使用 Matlab R2016a 中的 DOMFluor 工具箱 (version 1.7) 处理三维荧光数据并进行 PARAFAC 分析.

2 结果与分析

2.1 DOM 紫外-可见光吸收特征

丰乐河、杭埠河、岐阳河、兆河和南淝河这 5 条河流 SUVA_{254} 分别为 (2.86 ± 0.23) 、 (2.67 ± 0.53) 、 (2.96 ± 1.04) 、 (2.92 ± 0.35) 和 (1.87 ± 0.22) $\text{L} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m})^{-1}$ (图 2). 岐阳河水体 DOM 的 SUVA_{254} 最高, 而南淝河 SUVA_{254} 显著低于其它 4 条河流 ($P < 0.05$). 5 条河流 S_R 分别为 0.86 ± 0.09 、 0.80 ± 0.11 、 0.87 ± 0.09 、 0.96 ± 0.11 和 0.94 ± 0.11 . 杭埠河 S_R 最低 (图 2), 且显著低于兆河和南淝河 ($P < 0.05$).

2.2 DOM 荧光组分特征

使用 PARAFAC 对河流水样 DOM 的三维荧光图谱进行分析, 共得到 6 种荧光组分 (C1 ~ C6, 图 3). C1 [$E_x(235/335 \text{ nm})/E_m(435 \text{ nm})$] 是普遍存在的类腐殖质组分, 主要来自陆源^[32,33]. C2 [$E_x(245 \text{ nm})/E_m(390/475 \text{ nm})$] 在 245 nm 激发波长处有两个发射波长 (390 nm 和 475 nm), 以 390 nm 发射波长处荧光峰为主, 来自微生物降解产物、城市排放污水和陆源腐殖质^[34~36]. C3 [$E_x(270/365 \text{ nm})/E_m(475 \text{ nm})$] 由两个峰值组成, 与紫外光区域 (A 峰) 和可见光区域的 (C 峰) 类腐殖质荧光峰相似, 是典型的类腐殖质峰^[33]. C4 [$E_x(220/310 \text{ nm})/E_m(405 \text{ nm})$] 类似于陆源类腐殖质荧光 A 峰和海洋类腐殖质荧光 M 峰^[9,33], 在本研究中 C4 是陆源腐殖质. C5 [$E_x(230/280 \text{ nm})/E_m(355 \text{ nm})$] 类似于

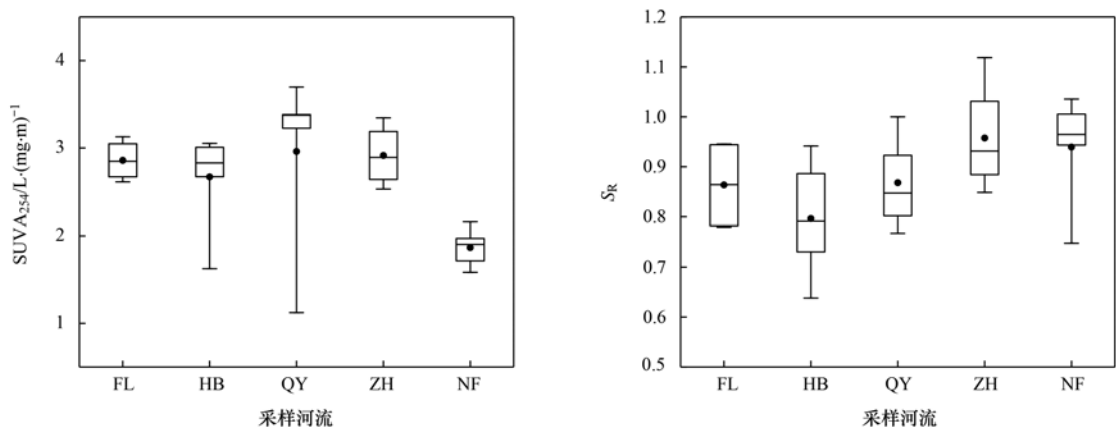


图 2 巢湖入湖河流水体 DOM 的 $SUVA_{254}$ 和 S_R 参数

Fig. 2 $SUVA_{254}$ and S_R of DOM in water from inflow rivers along the Chaohu Lake watershed

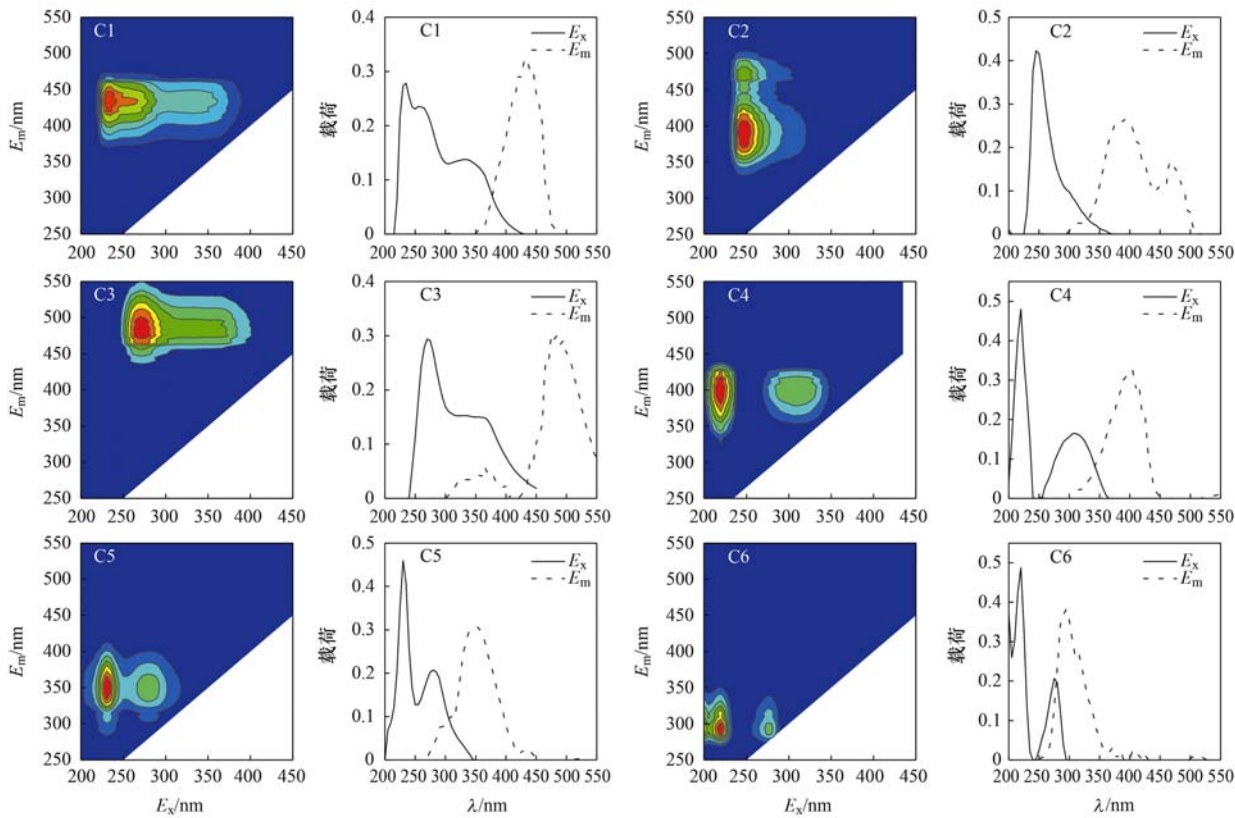


图 3 巢湖入湖河流水体 DOM 的荧光组分

Fig. 3 Fluorescent components of DOM in water from inflow rivers along the Chaohu Lake watershed

先前报道 PARAFAC 模型中的类色氨酸,是 1 种可生物降解的类蛋白质,与 DOM 中的芳香氨基酸有关^[37]. C6[$E_x(220/275\text{ nm})/E_m(295\text{ nm})$]类似于荧光 B 峰^[33],是内源类蛋白中的类酪氨酸组分.

2.3 DOM 荧光特征参数

丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河 DOM 荧光指数 FI 值在 2.04 ~ 2.17 之间,均大于 1.9,且无明显空间变化.南淝河各样点 FI 均值为 2.32 ± 0.32 ,且显著大于丰乐河和岐阳河($P < 0.05$),除 NF2 点位外,其它点位 FI 值均大于 1.90.南淝河 FI 值空间变化显著,在 NF2 最低,而在城区的 NF3 和 NF4 点最高.

丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河水样 DOM 的生物源指数 BIX 值在 0.84 ~ 1.00 之间(除 QY5 = 1.07),且无明显空间变化(图 4).南淝河水样 DOM 的 BIX 值均大于 1.00(除董铺水库 NF1 外),并显著高于其它河流($P < 0.05$),从上游到下游呈逐渐增大趋势.丰乐河、杭埠河、岐阳河、兆河和南淝河水样 DOM 的腐殖化指数 HIX 范围分别为 4.04 ~ 5.55、2.90 ~ 5.99、2.93 ~ 8.16、3.32 ~ 5.23 和 1.15 ~ 4.41(图 4),南淝河 DOM 的 HIX 值显著低于其它河流($P < 0.05$).丰乐河、兆河和南淝河水样 DOM 的 HIX 值从上游到下游呈降低趋势,其中南淝河下降

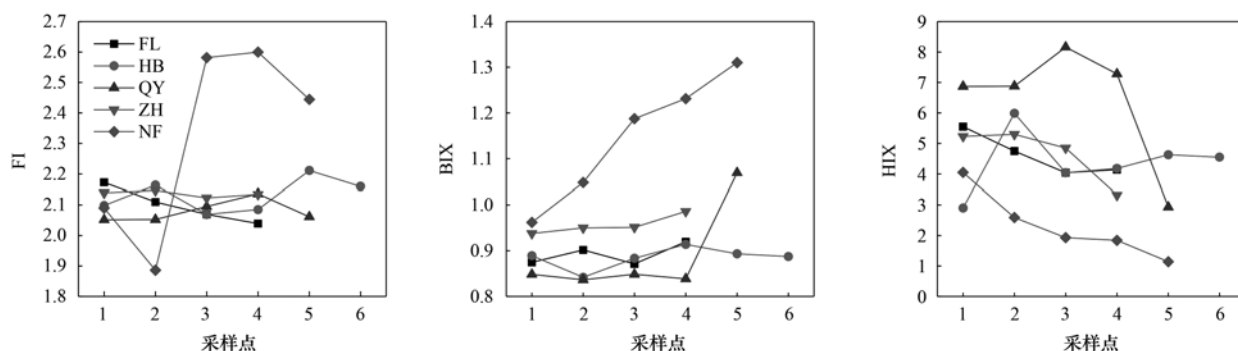


图4 巢湖入湖河流水体 DOM 的 FI、BIX 和 HIX 空间变化

Fig. 4 Spatial variations of FI, BIX, and HIX of DOM in water from inflow rivers along the Chaohu Lake watershed

趋势更为明显. 杭埠河中, HB2 点水样 DOM 的 HIX 值大于其它采样点. QY1 ~ QY4 点水样 DOM 的 HIX 值均大于其它河流样点, 而河口区 (QY5) HIX 值显著降低.

3 讨论

3.1 入湖河流 DOM 芳香性与分子量

丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河的水体 DOM 吸收特征参数 $SUVA_{254}$ 显著高于南淝河 (图 2), 这主要是由于丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河流经大片农业种植区和林区, 地表径流把芳香性较高的陆源腐殖质带入河流, 使水体 DOM 芳香性高于南淝河. 这与夏季松花江流域相关研究结果类似, 受城市污水和工业废水污染严重的松花江流域饮马河和伊通河河水 DOM 的 $SUVA_{254}$ [$(3.70 \pm 0.64) L \cdot (mg \cdot m)^{-1}$ 和 $(3.48 \pm 0.73) L \cdot (mg \cdot m)^{-1}$] 显著小于受污染较轻的松花江干流段 [$(4.78 \pm 0.63) L \cdot (mg \cdot m)^{-1}$ 和 $(5.85 \pm 0.83) L \cdot (mg \cdot m)^{-1}$] [38], 表明受城市污水影响的河流水体 DOM 芳香性小于受农业径流影响的河流.

本研究中河流水体 DOM 的 S_R 值 (0.64 ~ 1.11) 与江苏省天目湖流域入湖河流宋河 (0.89 ± 0.11)、平桥河 (0.90 ± 0.11) 和中田河 (0.96 ± 0.10) 水体 DOM 的研究结果相似 [39], 但明显低于三峡水库 (1.20 ± 0.33)、太湖 (1.80 ± 0.03) 和云贵高原 38 个湖泊 (3.13 ± 1.83) 等水库和湖泊水体 DOM 的 S_R 值 [13, 31, 40]. 有研究表明 DOM 在水库和湖泊水体中停留时间较长, 光漂白作用使水体大分子 DOM 向小分子转化 [2, 41], 而本研究中河流水体停留时间短, 有机质降解较弱, 导致检测到的 DOM 分子量较大.

湖泊水体相关研究发现 DOM 分子量与芳香性联系紧密 [42], 而本研究结果中 $SUVA_{254}$ 和 S_R 并没有明显关系. 对三峡水库水体 DOM 的研究也发现 $SUVA_{254}$ 和 S_R 是相对独立的 [40]; 有研究显示夏季闽江水体在经过市区时 DOM 分子量也没有明显变

化 [43]. 这些结果表明水体 $SUVA_{254}$ 和 S_R 之间并不总是相互对应, 城市污水的排入降低了水体 DOM 的芳香性, 但对分子量影响较低.

3.2 入湖河流 DOM 来源

入湖河流 DOM 荧光组分 C1、C3 和 C4 之间极显著相关 (表 2), 结合荧光特征可以确定它们为陆源腐殖质组分; 两个类蛋白荧光峰 C5 (类色氨酸) 和 C6 (类酪氨酸) 极显著相关 (表 2), 对比先前研究得出的 PARAFAC 模型 [36] 确定它们为内源类蛋白组分; 海洋水体和以陆源 DOM 为主的河口区域均发现与 C2 相似的荧光团 [33, 34], 同时有研究表明 C2 与浮游植物降解 [11, 33] 和城市排放污水中的 DOM 有关 [34], C2 与类腐殖质 (C1、C3 和 C4) 和类蛋白组分中的 C5 (类色氨酸) 均显著相关, 指示其为具有双重来源的微生物降解产物. 类蛋白组分 (C5 和 C6) 与类腐殖质组分 (C1、C3 和 C4) 没有相关性 (表 2), 表明两类组分具有不同的来源.

夏季巢湖 5 条入湖河流水体 DOM 类腐殖质组分 (C1 + C3 + C4)、微生物降解产物组分 (C2) 和内源类蛋白组分 (C5 + C6) 相对丰度如图 5 所示. 丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河类腐殖质组分相对丰度显著高于南淝河 ($P < 0.05$); 丰乐河、岐阳河和兆河流域以耕地为主而杭埠河流域以林地和以耕地为主 (表 1), 这些河流陆地径流外源输入明显. 丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河的 DOM 腐殖质组分相对丰度与滇池流域丰水期河流 (54.3%) 相似 [44], 但明显小于太白山自然保护区夏季河流水体 (82% ~ 96%) [45], 这主要是由于太白山自然保护区以森林和草地覆盖为主, 而丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河的 DOM 腐殖质组分以耕地土壤有机质为主. 南淝河 DOM 类蛋白组分相对丰度显著大于其它河流 ($P < 0.05$), 其流经合肥市城区, 周边城市建设用地面积比例较大 (表 1), 受城市污水处理厂排水影响, 内源特征明显; 对宁波市不同水体 DOM 的研究结果也显示, 城乡结合区域由于受到生活污水排放影响,

水体类蛋白组分相对丰度(59.4%)最高^[46],结果表明城市覆盖程度较高的河流类蛋白相对丰度较高.整体上,夏季巢湖入湖河流水体有机质组分受小流域土地使用类型影响明显,河流 DOM 荧光组分相对丰度反映了显著的来源差异.

荧光指数 FI 是判断 DOM 内外源的重要指标,当 $FI > 1.90$ 时,DOM 以微生物产生的内源为主,而当 $FI < 1.40$ 时,DOM 则以陆源输入为主^[47].丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河 FI 值(2.04 ~ 2.17)指示这些河流水体 DOM 以内源为主,且没有明显的空间变化.穿过主城区的南淝河 NF3 ~ NF5 点位 FI 值明显增加,指示其 DOM 主要以内源为主.有研究表明城市污水 DOM 以微生物作用下产生的类蛋白组分为主^[48].南淝河 DOM 荧光指数 FI 值大于其它河流,与庐江河研究结果相似,被农业土地包围的上游河流小于被城市包围的下游河流水体 DOM 的 FI 值^[49],表明城市纳污河流 DOM 内源特征强于受农田径流影响的河流.

BIX 指数是表征 DOM 自生源强弱的指标^[21,50],BIX 值为 0.60 ~ 0.80 时,指示较少的自生源贡献,BIX 值为 0.8 ~ 1.0 时,指示自生源特征较显著,而当 $BIX > 1.00$ 时,DOM 以自生源贡献为主^[33,51].丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河除 QY5 点($BIX = 1.07$)外,BIX 值在 0.80 ~ 1.00 之间,指示水体 DOM 自生源贡

献较多;QY5 水体 BIX 值高于其它采样点,这是由于 QY5 是河流入湖口,水流平缓,受水体蓝藻腐败和微生物产生的 DOM 影响,使水体以自生源 DOM 为主.南淝河除 NF1 点($BIX = 0.96$)外,水体 DOM 的 BIX 值均大于 1.0,沿河流方向逐步升高,指示了南淝河水体 DOM 以自生源贡献为主.

DOM 的 HIX 指数是评价其腐殖化程度的指标^[21,52],当 $HIX < 1.50$ 时,指示 DOM 主要来源于微生物,当 HIX 为 1.50 ~ 3.00 时,具有较弱的腐殖质特征和明显的内源特征,而 $HIX > 3.00$ 则指示较强的腐殖质特征.南淝河水体 DOM 的 HIX 值在 5 条河流中最小(2.37 ± 1.25 ,图 4),指示南淝河水体内源 DOM 特征明显.从上游 NF1 到下游 NF5,腐殖质特征不断减弱,内源特征不断增强,与 BIX 指数结果相一致.其它河流水体 DOM 的 HIX 指示了较强的腐殖质输入特征,主要是流经农业种植区,受农田土壤有机质径流的输入影响.

综合上述分析,夏季巢湖流域 5 条入湖河流 DOM 来源为陆源有机质、内源类蛋白和经微生物降解产生的次生 DOM.巢湖入湖河流 DOM 具有不同的来源特征,丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河受农田土壤 DOM 输入影响,腐殖化程度较高,而南淝河水体 DOM 主要受城市生活污水输入的影响,腐殖化程度较低.

表 2 DOM 荧光组分(C1 ~ C6)之间的相关性¹⁾

Table 2 Correlations among the fluorescent components (C1-C6) of DOM

	C1	C2	C3	C4	C5	C6
C1	1	0.672 **	0.985 **	0.890 **	0.227	-0.243
C2		1	0.579 **	0.760 **	0.620 **	0.236
C3			1	0.866 **	0.080	-0.369
C4				1	0.283	-0.015
C5					1	0.732 **
C6						1

1) ** 表示 $P < 0.01$

3.3 入湖河流 DOM 空间变化

巢湖入湖河流 DOC 和 DOM 组分荧光强度空间变化如图 6 所示.丰乐河水体 DOC 和类蛋白荧光强度 [$F(C5 + C6)$] 变化趋势相似[图 6(a)和 6(e)],在 FL3 之前呈上升趋势,而陆源腐殖质荧光强度 [$F(C1 + C3 + C4)$,图 6(d)]以及 HIX 值(图 4)逐渐降低,表明丰乐河微生物以及水生植物产生的内源 DOM 增加,同时微生物和光漂白把芳香性较高的陆源腐殖质降解为小分子 DOM,使 DOC 逐渐升高;DOC 在 FL4 明显降低,而总荧光强度 $a(355)$ [图 6(b)], F_T [图 6(c)], $F(C1 + C3 + C4)$ 、 $F(C5 + C6)$ 和 $F(C2)$ [图 6(f)]没有明显变化,表明 DOM 被降解,且没有较强的外源或内源输入变化使 CDOM 和

DOM 荧光组分发生明显变化.杭埠河水体 DOC、 $a(355)$ 、 F_T 、 $F(C1 + C3 + C4)$ 和 $F(2)$ 沿河流方向均呈不断上升的趋势,指示农田土壤径流携带的 DOM 不断增加.HB2 水样 $F(C5 + C6)$ 明显降低,且 HIX 值最高(图 4),指示了大量的陆源 DOM 输入稀释了类蛋白组分并成为主要组分.

岐阳河上游以林地和农业种植区为主,大量腐殖质通过地表径流进入水体,导致水体 DOC 和陆源腐殖质含量较高,且无明显空间变化. $a(355)$ 与 F_T 、 $F(C1 + C3 + C4)$ 和 $F(C2)$ 呈相似的空间变化特征,且 $F(C1 + C3 + C4)$ 荧光强度较强,表明岐阳河水体 CDOM 受陆源腐殖质影响较大.QY5 点 F_T 、 $F(C1 + C3 + C4)$ 和 $F(C2)$ 明显降低,而 $F(C5 + C6)$ 达到最

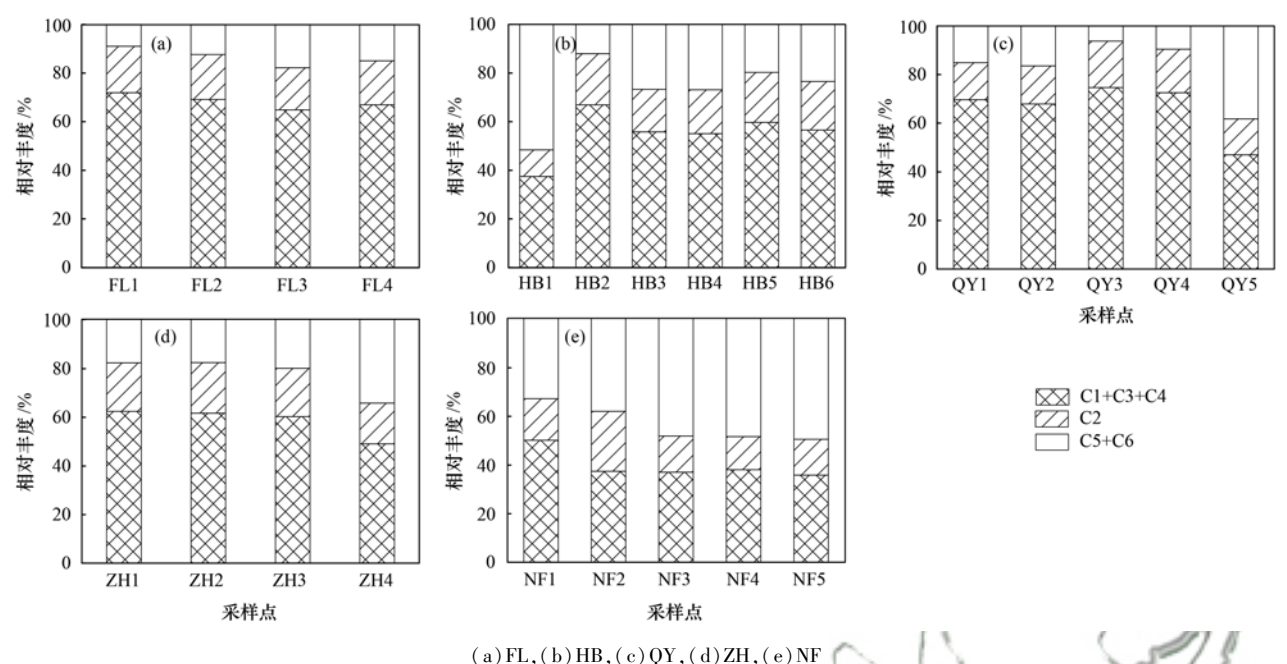


图5 巢湖入湖河流水体 DOM 荧光组分相对丰度

Fig. 5 Relative contribution of fluorescent components in water from inflow rivers along the Chaohu Lake watershed

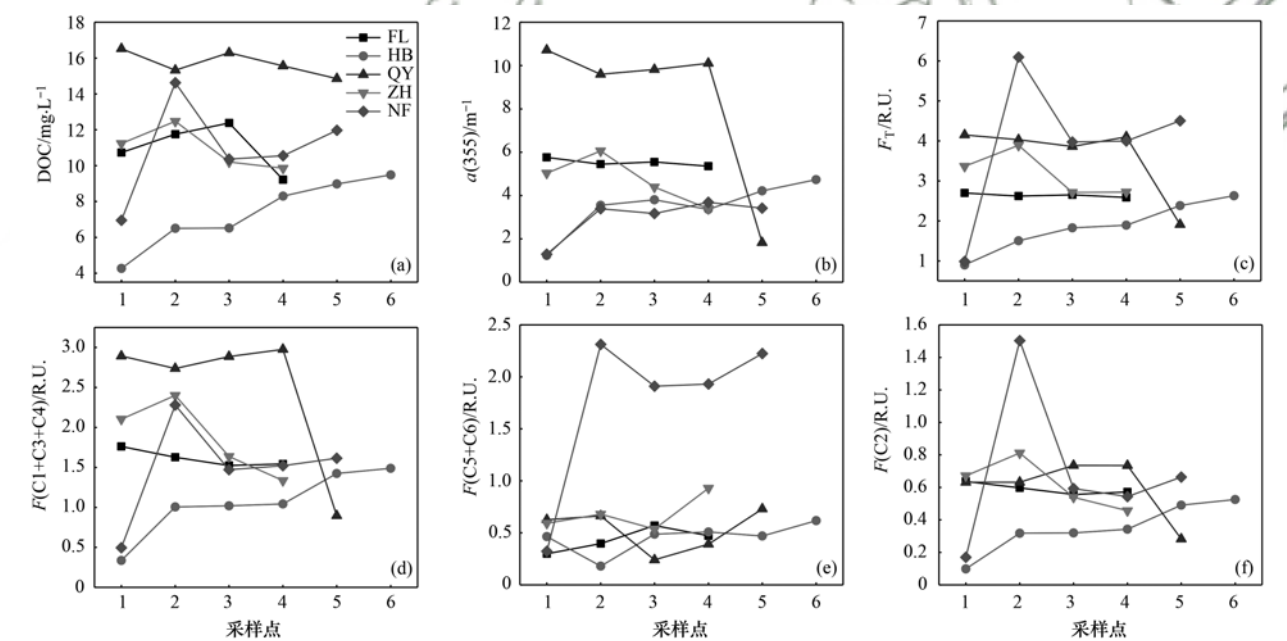


图6 巢湖入湖河流水体 DOC 和 DOM 荧光强度空间变化

Fig. 6 Spatial variations in DOC and DOM fluorescence intensity in water from inflow rivers along the Chaohu Lake watershed

大值,可能是由于 QY5 点为河口区,河流水与湖泊水在这里混合,蓝藻分解为水体提供了大量的内源 DOM,同时湖泊水体 DOM 较长的停留时间,光漂白使大分子荧光有机物降解为非荧光小分子有机物,导致混合水体 DOM 荧光强度下降,类似的现象在太湖入湖口和开敞区水体研究中也发现^[53]。此外,QY5 点 BIX 明显升高、HIX 明显降低(图 4),进一步指示了水体 DOM 较强的内源特征。

兆河水体 DOC、 $\alpha(355)$ 、 F_T 、 $F(C1+C3+C4)$ 和 $F(C2)$ 在 ZH2 点最高,与 HIX 趋势相似,表明在

陆源腐殖质输入在 ZH2 最强,ZH2 之后外源输入减少以及类腐殖质被微生物和光化学降解使它们逐渐降低。 $F(C5+C6)$ 在 ZH4 点最大,表明兆河下游水生生物产生较多的内源类蛋白。

南淝河水体 DOC、 F_T 、 $F(C1+C3+C4)$ 、 $F(C5+C6)$ 和 $F(C2)$ 变化趋势相似,在 NF1 点最低,NF2 点最高。NF2 落叶腐败聚集大量的腐殖质和类蛋白,同时较高的腐殖质和类蛋白含量,使以腐殖质和类蛋白为来源的 $F(C2)$ 增加。南淝河水体 $\alpha(355)$ 在 NF2 点升高后,没有明显空间变化,表明雨水径流和

污水处理厂排水使水体 CDOM 含量增加. 南淝河水体 $F(C1 + C3 + C4)$ 在 NF3 ~ NF5 没有明显变化, 且荧光强度较高, 有研究表明城市雨水径流中腐殖质含量较高^[54], 因此城市径流中 DOM 的输入使南淝河水体中腐殖质荧光强度较高. $F(C5 + C6)$ 在 NF3 ~ NF5 逐渐增加, 表明水体 DOM 内源组分不断增加, 研究表明污水处理厂排水中的 DOM 携带大量类蛋白, 同时也易于被微生物利用产生类蛋白^[48].

丰乐河、杭埠河、岐阳河、兆河和南淝河水体 CDOM 相对含量 $a(355)$ 分别为 (5.53 ± 0.18) 、 (3.48 ± 1.21) 、 (8.41 ± 3.71) 、 (4.72 ± 1.12) 和 $(2.99 \pm 0.97) \text{ m}^{-1}$. 耕地和林地覆盖较高的丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河中, 仅岐阳河水体 CDOM 的相对含量显著大于城市建设用地覆盖较高的南淝河 (表 1, $P < 0.05$). 丰乐河、杭埠河、兆河和南淝河 $a(355)$ 与太白山自然保护区河流霸王河、黑河、石头河和湑水河 $[(4.51 \pm 1.11)$ 、 (3.33 ± 1.46) 、 (3.08 ± 1.58) 和 $(5.61 \pm 2.12) \text{ m}^{-1}]$ 的结果相似^[45], 指示受农田径流和受城市生活污水影响的河流 CDOM 含量并没有明显差异.

4 结论

(1) 城市污染径流和污水处理厂出水排入降低了南淝河水体 DOM 芳香性, 而对分子量影响较低.

(2) 2019 年夏季巢湖 5 条河流水体 DOM 主要来源为陆源有机质的输入 (C1、C3 和 C4), 内源类蛋白组分的释放 (C5 和 C6) 以及陆源和内源 DOM 经微生物降解的产物 (C2).

(3) 巢湖 5 条河流河水溶解性有机碳 (DOC) 和 DOM 荧光组分呈不同的空间变化趋势, 其中丰乐河、杭埠河、岐阳河和兆河 DOM 受农田土壤径流输入影响明显, 而南淝河 DOM 主要受城市径流和生活污水影响.

参考文献:

- [1] Wu F C, Tanoue E, Liu C Q. Fluorescence and amino acid characteristics of molecular size fractions of DOM in the waters of Lake Biwa[J]. *Biogeochemistry*, 2003, **65**(2): 245-257.
- [2] Catalán N, Marcé R, Kothawala D N, *et al.* Organic carbon decomposition rates controlled by water retention time across inland waters[J]. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(7): 501-504.
- [3] 梁梦琦, 邵美玲, 曹昌丽, 等. 城郊与城镇河流中溶解性有机质与重金属的相关性[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 2095-2103.
- [4] Liang M Q, Shao M L, Cao C L, *et al.* Characteristics of dissolved organic matter (DOM) and relationship with dissolved heavy metals in a peri-urban and an urban river[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 2095-2103.
- [5] Dong Y R, Li Y, Kong F L, *et al.* Source, structural characteristics and ecological indication of dissolved organic matter extracted from sediments in the primary tributaries of the Dagou River[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **109**, doi: 10.1016/j.ecolind.2019.105776.
- [6] Wipfli M S, Richardson J S, Naiman R J. Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems: transport of organic matter, invertebrates, and wood down headwater channels[J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 2007, **43**(1): 72-85.
- [7] Lønborg C, Carreira C, Jickells T, *et al.* Impacts of global change on ocean dissolved organic carbon (DOC) cycling[J]. *Frontiers in Marine Science*, 2020, **7**, doi: 10.3389/fmars.2020.00466.
- [8] Fasching C, Wilson H F, D'Amario S C, *et al.* Natural land cover in agricultural catchments alters flood effects on DOM composition and decreases nutrient levels in streams[J]. *Ecosystems*, 2019, **22**(7): 1530-1545.
- [9] Li S D, Hou X, Shi Y, *et al.* Rapid photodegradation of terrestrial soil dissolved organic matter (DOM) with abundant humic-like substances under simulated ultraviolet radiation[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2020, **192**(2), doi: 10.1007/s10661-019-7945-7.
- [10] Shao T T, Wang T. Effects of land use on the characteristics and composition of fluvial chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in the Yiluo River watershed, China[J]. *Ecological Indicators*, 2020, **114**, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106332.
- [11] Wang Y L, Hu Y Y, Yang C M, *et al.* Variations of DOM quantity and compositions along WWTPs-river-lake continuum: implications for watershed environmental management[J]. *Chemosphere*, 2019, **218**: 468-476.
- [12] Wu J, Ye J, Peng H L, *et al.* Solar photolysis of soluble microbial products as precursors of disinfection by-products in surface water[J]. *Chemosphere*, 2018, **201**: 66-76.
- [13] Vodacek A, Blough N V, DeGrandpre M D, *et al.* Seasonal variation of CDOM and DOC in the middle Atlantic Bight: terrestrial inputs and photooxidation[J]. *Limnology and Oceanography*, 1997, **42**(4): 674-686.
- [14] Zhang Y L, Van Dijk M A, Liu M L, *et al.* The contribution of phytoplankton degradation to chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in eutrophic shallow lakes: field and experimental evidence[J]. *Water Research*, 2009, **43**(18): 4685-4697.
- [15] 陈昭宇, 李思悦. 三峡库区城镇化背景下河流 DOM 的吸收及荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- [16] Chen Z Y, Li S Y. Absorption and fluorescence spectra of dissolved organic matter in rivers of the Three Gorges Reservoir area under the background of urbanization[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(12): 5309-5317.
- [17] Lyu L, Wen Z D, Jacinthe P A, *et al.* Absorption characteristics of CDOM in treated and non-treated urban lakes in Changchun, China[J]. *Environmental Research*, 2020, **182**, doi: 10.1016/j.envres.2019.109084.
- [18] 陈俊伊, 王书航, 姜霞, 等. 巢湖表层沉积物荧光溶解性有机质 (FDOM) 荧光光谱特征[J]. *环境科学*, 2017, **38**(1): 70-77.
- [19] Chen J Y, Wang S H, Jiang X, *et al.* Fluorescence spectral characteristics of fluorescent dissolved organic matter (FDOM) in the surface sediments from Lihu Lake[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(1): 70-77.
- [20] Chen M L, Jung J, Lee Y K, *et al.* Production of tyrosine-like fluorescence and labile chromophoric dissolved organic matter (DOM) and low surface accumulation of low molecular weight-dominated DOM in a productive Antarctic sea[J]. *Marine*

- Chemistry, 2019, **213**: 40-48.
- [18] Weishaar J L, Aiken G R, Bergamaschi B A, *et al.* Evaluation of specific ultraviolet absorbance as an indicator of the chemical composition and reactivity of dissolved organic carbon [J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37** (20): 4702-4708.
- [19] Helms J R, Stubbins A, Ritchie J D, *et al.* Absorption spectral slopes and slope ratios as indicators of molecular weight, source, and photobleaching of chromophoric dissolved organic matter [J]. Limnology and Oceanography, 2008, **53** (3): 955-969.
- [20] Zsolnay A, Baigar E, Jimenez M, *et al.* Differentiating with fluorescence spectroscopy the sources of dissolved organic matter in soils subjected to drying [J]. Chemosphere, 1999, **38** (1): 45-50.
- [21] Huguet A, Vacher L, Relexans S, *et al.* Properties of fluorescent dissolved organic matter in the Gironde estuary [J]. Organic Geochemistry, 2009, **40** (6): 706-719.
- [22] 沈烁, 王育来, 杨长明, 等. 南淝河不同排口表层沉积物 DOM 光谱特征 [J]. 中国环境科学, 2014, **34** (9): 2351-2361.
- Shen S, Wang Y L, Yang C M, *et al.* Spectral characteristic of dissolved organic matter (DOM) in the surface sediments from different discharging points along the Nanfei River in Hefei City, Anhui Province [J]. China Environmental Science, 2014, **34** (9): 2351-2361.
- [23] 王菁哈, 何吕奇姝, 杨成, 等. 太湖、巢湖、滇池水华与相关气象、水质因子及其响应的比较 (1981-2015 年) [J]. 湖泊科学, 2018, **30** (4): 897-906.
- Wang J H, He L Q S, Yang C, *et al.* Comparison of algal bloom related meteorological and water quality factors and algal bloom conditions among lakes Taihu, Chaohu, and Dianchi (1981-2015) [J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30** (4): 897-906.
- [24] 吴蕾, 刘桂建, 周春财, 等. 巢湖水体可溶态重金属时空分布及污染评价 [J]. 环境科学, 2018, **39** (2): 738-747.
- Wu L, Liu G J, Zhou C C, *et al.* Temporal-spatial distribution and pollution assessment of dissolved heavy metals in Chaohu Lake [J]. Environmental Science, 2018, **39** (2): 738-747.
- [25] 周俊成. 巢湖流域径流量时间分配及趋势变化分析 [J]. 治淮, 2018, (11): 9-11.
- [26] Zhang H, Cui K P, Guo Z, *et al.* Spatiotemporal variations of spectral characteristics of dissolved organic matter in river flowing into a key drinking water source in China [J]. Science of the Total Environment, 2020, **700**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.134360.
- [27] 张欢, 崔康平, 张强, 等. 派河水体中 DOM 的光谱分析及其来源解析 [J]. 环境科学研究, 2019, **32** (2): 227-234.
- Zhang H, Cui K P, Zhang Q, *et al.* Spectral analysis and source analysis of dissolved organic matter in Pai River [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, **32** (2): 227-234.
- [28] Ferrari G M, Dowell M D. CDOM absorption characteristics with relation to fluorescence and salinity in coastal areas of the southern Baltic Sea [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1998, **47** (1): 91-105.
- [29] Twardowski M S, Boss E, Sullivan J M, *et al.* Modeling the spectral shape of absorption by chromophoric dissolved organic matter [J]. Marine Chemistry, 2004, **89** (1-4): 69-88.
- [30] Lawaet A J, Stedmon C A. Fluorescence intensity calibration using the Raman scatter peak of water [J]. Applied Spectroscopy, 2009, **63** (8): 936-940.
- [31] Cory R M, McKnight D M. Fluorescence spectroscopy reveals ubiquitous presence of oxidized and reduced quinones in dissolved organic matter [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39** (21): 8142-8149.
- [32] Zhang Y L, Zhang E L, Yin Y, *et al.* Characteristics and sources of chromophoric dissolved organic matter in lakes of the Yungui Plateau, China, differing in trophic state and altitude [J]. Limnology and Oceanography, 2010, **55** (6): 2645-2659.
- [33] Coble P G. Characterization of marine and terrestrial DOM in seawater using excitation-emission matrix spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 1996, **51** (4): 325-346.
- [34] Stedmon C A, Markager S, Bro R. Tracing dissolved organic matter in aquatic environments using a new approach to fluorescence spectroscopy [J]. Marine Chemistry, 2003, **82** (3-4): 239-254.
- [35] Murphy K R, Hambly A, Singh S, *et al.* Organic matter fluorescence in municipal water recycling schemes: toward a unified PARAFAC model [J]. Environmental Science & Technology, 2011, **45** (7): 2909-2916.
- [36] Stedmon C A, Markager S. Resolving the variability in dissolved organic matter fluorescence in a temperate estuary and its catchment using PARAFAC analysis [J]. Limnology and Oceanography, 2005, **50** (2): 686-697.
- [37] Yao X, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Resolving the variability of CDOM fluorescence to differentiate the sources and fate of DOM in Lake Taihu and its tributaries [J]. Chemosphere, 2011, **82** (2): 145-155.
- [38] Zhao Y, Song K S, Lv L L, *et al.* Relationship changes between CDOM and DOC in the Songhua River affected by highly polluted tributary, northeast China [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25** (25): 25371-25382.
- [39] 牛城, 张运林, 朱广伟, 等. 天目湖流域 DOM 和 CDOM 光学特性的对比 [J]. 环境科学研究, 2014, **27** (9): 998-1007.
- Niu C, Zhang Y L, Zhu G W, *et al.* Comparison of optical properties of DOM and CDOM in Lake Tianmuhu catchment [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, **27** (9): 998-1007.
- [40] Jiang T, Wang D Y, Wei S Q, *et al.* Influences of the alternation of wet-dry periods on the variability of chromophoric dissolved organic matter in the water level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir area, China [J]. Science of the Total Environment, 2018, **636**: 249-259.
- [41] Song K S, Shang Y X, Wen Z D, *et al.* Characterization of CDOM in saline and freshwater lakes across China using spectroscopic analysis [J]. Water Research, 2019, **150**: 403-417.
- [42] Jane S F, Winslow L A, Remucal C K, *et al.* Long-term trends and synchrony in dissolved organic matter characteristics in Wisconsin, USA, lakes: quality, not quantity, is highly sensitive to climate [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2017, **122** (3): 546-561.
- [43] 程琼, 庄婉娥, 王辉, 等. 夏季闽江 CDOM 的空间分布与降解特征 [J]. 环境科学, 2019, **40** (1): 157-163.
- Cheng Q, Zhuang W E, Wang H, *et al.* Spatial distribution and degradation of CDOM in the Minjiang River in summer [J]. Environmental Science, 2019, **40** (1): 157-163.
- [44] 卜鸡明, 何佳, 焦立新, 等. 滇池流域入湖河流溶解性有机质的分布及来源 [J]. 环境科学学报, 2020, **40** (8): 2795-2804.
- Bu J M, He J, Jiao L X, *et al.* Analysis of distribution characteristics and source of dissolved organic matter in the rivers that flow into the Dianchi Lake Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2020, **40** (8): 2795-2804.
- [45] 张文浩, 赵铎霖, 王晓毓, 等. 太白山自然保护区水体

- CDOM 吸收与三维荧光特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(11): 4958-4969.
- Zhang W H, Zhao D L, Wang X Y, *et al.* Absorption and three dimensional fluorescence spectra of CDOM in the Water of the Taibaishan Nature Reserve[J]. Environmental Science, 2020, **41**(11): 4958-4969.
- [46] 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 等. 溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系: 基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)[J]. 环境科学, 2019, **40**(4): 1751-1759.
- Li Y, Wei H J, Wang K, *et al.* Analysis of the relationship between dissolved organic matter (DOM) and watershed land-use based on three-dimensional fluorescence-parallel Factor (EEM-PARAFAC) analysis [J]. Environmental Science, 2019, **40**(4): 1751-1759.
- [47] 王涛, 邵田田, 梁晓文, 等. 夏季高原河流 CDOM 光学特性、组成及来源研究[J]. 环境科学学报, 2019, **39**(3): 668-678.
- Wang T, Shao T T, Liang X W, *et al.* Optical characteristics, composition and sources of colored dissolved organic matter in plateau rivers in summer[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, **39**(3): 668-678.
- [48] 姜德刚, 陈慧, 徐金燕, 等. 不同客水对南淝河水体富营养化的影响及其降解特征[J]. 安徽农业科学, 2017, **45**(19): 51-55.
- Jiang D G, Chen H, Xu J Y, *et al.* Effects of foreign water on trophic state for Nanfei River and its degradation characteristics [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2017, **45**(19): 51-55.
- [49] Tao P R, Jin M, Yu X B, *et al.* Spatiotemporal variations in chromophoric dissolved organic matter (CDOM) in a mixed land-use river: Implications for surface water restoration[J]. Journal of Environmental Management, 2021, **277**, doi: 10.1016/j.jenvman.2020.111498.
- [50] Xu H C, Guo L D. Molecular size-dependent abundance and composition of dissolved organic matter in river, lake and sea waters[J]. Water Research, 2017, **117**: 115-126.
- [51] Ziegelgruber K L, Zeng T, Arnold W A, *et al.* Sources and composition of sediment pore-water dissolved organic matter in prairie pothole lakes[J]. Limnology and Oceanography, 2013, **58**(3): 1136-1146.
- [52] 杜士林, 李强, 丁婷婷, 等. 沙颍河流域水体中溶解性有机质(DOM)的荧光光谱解析[J]. 环境化学, 2019, **38**(9): 2027-2037.
- Du S L, Li Q, Ding T T, *et al.* Fluorescence spectra analysis of DOM in water of Shaying River Basin [J]. Environmental Chemistry, 2019, **38**(9): 2027-2037.
- [53] 刘明亮, 张运林, 秦伯强. 太湖入湖河口和开敞区 CDOM 吸收和三维荧光特征[J]. 湖泊科学, 2009, **21**(2): 234-241.
- Liu M L, Zhang Y L, Qin B Q. Characterization of absorption and three-dimensional excitation-emission matrix spectra of chromophoric dissolved organic matter at the river inflow and the open area in Lake Taihu[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, **21**(2): 234-241.
- [54] 聂云汉, 陈浩, 李磊, 等. 城市雨水径流中溶解性有机物的分子化学多样性[J]. 环境科学, 2020, **41**(5): 2272-2280.
- Nie Y H, Chen H, Li L, *et al.* Molecular chemo-diversity of the dissolved organic matter occurring in urban stormwater runoff[J]. Environmental Science, 2020, **41**(5): 2272-2280.

CONTENTS

Characteristics and Control Strategies on Summertime Peak Ozone Concentration in Shanghai	YAN Ru-sha, WANG Hong-li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (3577)
Characteristics and Sources of VOCs at Different Ozone Concentration Levels in Tianjin	WANG Wen-mei, GAO Jing-yun, XIAO Zhi-mei, <i>et al.</i> (3585)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of Atmospheric VOCs During Ozone Pollution Period in the Main Urban Area of Chongqing	LI Ling, LI Zhen-liang, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3595)
Emission Characteristics and Atmospheric Chemical Reactivity of Volatile Organic Compounds(VOCs) in Automobile Repair Industry	CHEN Peng, ZHANG Yue, ZHANG Liang, <i>et al.</i> (3604)
Analysis of the Continuous Heavy Pollution Process in the Winter of 2016 in Beijing, Tianjin, and Hebei	MAO Ye, ZHANG Heng-de, ZHU Bin (3615)
Evaluation of Air Pollution Characteristics and Air Quality Improvement Effect in Beijing and Chengdu	DANG Ying, ZHANG Xiao-ling, RAO Xiao-qin, <i>et al.</i> (3622)
Chemical Components and Sources of PM _{2.5} and Their Evolutive Characteristics in Zhengzhou	ZHAO Xiao-nan, WANG Shen-bo, YANG Jie-ru, <i>et al.</i> (3633)
High-frequency Responses to the COVID-19 Shutdown of Heavy Metal Elements in PM _{2.5} in Shanghai	CHENG Kai, CHANG Yun-hua, KUANG Ya-qiong, <i>et al.</i> (3644)
Analysis of Ultraviolet Aerosol Index in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area	DUAN Jia-le, JU Tian-zhen, HUANG Rui-rui, <i>et al.</i> (3652)
Vehicle Air Pollutant Emission Inventory and Characterization in Henan Province from 2016 to 2019	GAO Dan-dan, YIN Sha-sha, GU Xing-ke, <i>et al.</i> (3663)
Characterization and Exposure Risk Assessment of Non-phthalate Plasticizers in House Dust from Guangzhou	LIU Xiao-tu, PENG Chang-feng, CHEN Da, <i>et al.</i> (3676)
Distribution, Sources, and Risk Assessment of Polyfluoroalkyl Substances in Main Rivers and Soils of Tianjin	WU Qian-qian, WU Qiang, SONG Shuai, <i>et al.</i> (3682)
Differentiation of Hydrogen and Oxygen Isotopes in the Water Source Treatment Wetlands of Stream Networks	YANG Ting, WANG Yang, XU Jing-yi, <i>et al.</i> (3695)
Characterizing Sources and Composition of Chromophoric Dissolved Organic Matter in a Key Drinking Water Reservoir Lake Tianmu	ZHOU Lei, ZHOU Yong-qiang, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (3709)
Sources and Optical Dynamics of Chromophoric Dissolved Organic Matter in Different Types of Urban Water Bodies	YU Xiao-qin, CUI Yang, CHEN Hui-min, <i>et al.</i> (3719)
Temporal and Spatial Evolution Characteristics of DOM Spectra in Sediment Interstitial Water in Typical Zones of Baiyangdian Lake	ZHOU Shi-lei, CHEN Zhao-ying, ZHANG Tian-na, <i>et al.</i> (3730)
Sources and Spatial Variation of Dissolved Organic Matter in Summer Water of Inflow Rivers Along Chaohu Lake Watershed	NING Cheng-wu, BAO Yan, HUANG Tao, <i>et al.</i> (3743)
Spatio-temporal Distribution Characteristics and Driving Factors of Zooplankton in Hongze Lake	CHEN Ye, PENG Kai, ZHANG Qing-ji, <i>et al.</i> (3753)
Effects of Farming Practices on Soil Nitrogen and Phosphorus Concentrations and Its Loss in the Drawdown Area of the Tributary Embayment of the Three Gorges Reservoir	LUO Fang, LU Lun-hui, LI Zhe, <i>et al.</i> (3763)
Temporal and Spatial Evolution of Non-point Source Pollution Load of Total Nitrogen in Tuojiang River Basin	XIAO Yu-ting, YAO Jing, CHEN Shu, <i>et al.</i> (3773)
Microplastic-Induced Alterations to Antibiotic Resistance Genes in Seawater	ZHOU Shu-yi-dan, ZHU Yong-guan, HUANG Fu-yi (3785)
Enrichment of Antibiotic Resistant Bacteria and Antibiotic Resistance Genes by Sulfamethoxazole in the Biological Treatment System of Mariculture Wastewater	WANG Jin-peng, ZHAO Yang-guo, HU Yu-bo (3791)
Optimization of Tidal-Combined Flow Constructed Wetland System and Its Removal Effect on Antibiotic Resistance Genes	CHENG Yu-xiao, WU Dan, CHEN Quan-le, <i>et al.</i> (3799)
Temporal-spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Soil of Xiangxi Bay in Three Gorges Reservoir Area	HUANG Ying-ping, JIN Lei, ZHU Can, <i>et al.</i> (3808)
Spatial Distribution Pattern and Influencing Factors of Industrial Pollution Emissions in Yangtze River Economic Belt	LI Yun-yi, LIU Li-ping, LIU Yuan-yuan (3820)
Aging Process and DOC Analysis of Four Different Types of Plastic Particles in Freshwater Systems	LI Wan-yi, LIU Zhi-lin, MIAO Ling-zhan, <i>et al.</i> (3829)
Promotion and Mechanisms of DOM on Copper Adsorption by Suspended Sediment Particles	DING Xiang, LI Zhong-wu, XU Wei-hua, <i>et al.</i> (3837)
Transformation Characteristics of Dissolved Organic Matter During UV/Chlorine Treatment of Municipal Secondary Effluent	WANG Xue-ning, ZHANG Bing-liang, PAN Bing-cai (3847)
Effects of Different Nitrite Generation on the Short-cut Nitrification Denitrifying Phosphorus Removal Granules System	WANG Wen-qi, LI Dong, GAO Xin, <i>et al.</i> (3858)
Ammonia Nitrogen Removal Performance with Parallel Operation of Conventional and Inverted A ² /O Sewage Treatment Processes in Winter	LI Jin-cheng, GUO Ya-ni, QI Rong, <i>et al.</i> (3866)
Diversity and PICRUS2-based Predicted Functional Analysis of Bacterial Communities During the Start-up of ANAMMOX	YAN Bing, FU Jia-qi, XIA Song, <i>et al.</i> (3875)
Microbial Community Structure of Activated Sludge and Its Response to Environmental Factors	MA Qie-qie, YUAN Ling-jiang, NIU Ze-dong, <i>et al.</i> (3886)
Distribution and Sources of Microplastics in Farmland Soil Along the Fenhe River	ZHU Yu-en, WEN Han-xuan, LI Tang-hui-xian, <i>et al.</i> (3894)
Source Apportionment of Soil PAHs in Lanzhou Based on GIS and APCS-MLR Model	GUAN Xian-xian, ZHOU Xiao-ping, LEI Chun-ni, <i>et al.</i> (3904)
Migration, Transformation Characteristics, and Ecological Risk Evaluation of Heavy Metal Fractions in Cultivated Soil Profiles in a Typical Carbonate-Covered Area	TANG Shi-qi, LIU Xiu-jin, YANG Ke, <i>et al.</i> (3913)
Effect of Elevated CO ₂ on N ₂ O Emissions from Different Rice Cultivars in Rice Fields	YU Hai-yang, HUANG Qiong, WANG Tian-yu, <i>et al.</i> (3924)
Effects of Coconut Chaff Biochar Amendment on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Paddy Fields in Hot Areas	WANG Zi-jun, WANG Hong-hao, LI Jin-qiu, <i>et al.</i> (3931)
Effects of Biochar Addition Under Different Water Management Conditions on N ₂ O Emission From Paddy Soils in Northern Hainan	WANG Hong-hao, TAN Meng-yi, WANG Zi-jun, <i>et al.</i> (3943)
Ecological Effects of Species Diversity on Plant Growth and Physico-Chemical Properties in a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, CAO Jian-bing, LI Feng-mei, <i>et al.</i> (3953)
Investigation of Dominant Plants and Analysis of Ecological Restoration Potential in Lailishan Tin Tailings	QIN Fu-rong, ZHANG Shi-ying, XIA Yun-sheng, <i>et al.</i> (3963)
Responses of Different Degradation Stages of Alpine Wetland on Soil Microbial Community in the Yellow River Source Zone	LIN Chun-ying, LI Xi-lai, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (3971)
Effects of Straw Returning with Chemical Fertilizer on Soil Enzyme Activities and Microbial Community Structure in Rice-Rape Rotation	JIN Yu-ting, LI Xian-fan, CAI Ying, <i>et al.</i> (3985)
Shifts in Rhizosphere Bacterial Community Structure, Co-occurrence Network, and Function of <i>Miscanthus</i> Following Cadmium Exposure	CHEN Zhao-jin, LIN Li-an, LI Ying-jun, <i>et al.</i> (3997)
Investigation of Soil Fungal Communities and Functionalities within Karst Paddy Fields	ZHOU Jun-bo, JIN Zhen-jiang, XIAO Xiao-yi, <i>et al.</i> (4005)
Adsorption Characteristics and Mechanism of Cd and Pb in Tiered Soil Profiles from a Zinc Smelting Site	LIU Ling-qing, XIAO Xi-yuan, GUO Zhao-hui, <i>et al.</i> (4015)
Influence of Different Soil Conditioner on the Transfer and Transformation of Cadmium and Phthalate Esters in Soil	WANG Can, ZHANG Yu-liang, HE Ming-jing, <i>et al.</i> (4024)
Immobilization Mechanism of Four Types of Amendments on Cu and Cd in Polluted Paddy Soil	DING Yuan, AO Shi-ying, CHEN Yi-hong, <i>et al.</i> (4037)
Foliar Application of L-Cysteine: Effects on the Concentration of Cd and Mineral Elements in Rice	ZHANG Ya-hui, WANG Chang-rong, LIU Yue-min, <i>et al.</i> (4045)
Effect of Cadmium Stress on Phytochelatins in <i>Amaranthus hypochondriacus</i> L. During Different Growth Periods	LIU Jia-xin, CHEN Wen-qing, YANG Li, <i>et al.</i> (4053)
Evolution of Material Metabolism in China's Pulp and Paper Industry	LIU Xin, YANG Tao, WU Hui-jun, <i>et al.</i> (4061)